

Experimental Modal Analysis (EMA) untuk Mengetahui Modal Parameter pada Analisis Dinamik Balok Kayu yang Dijepit di Satu Ujung

Oegik Soegihardjo^{1*}, Suhardjono², Bambang Pramujati³, Agus Sigit Pramono⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

²Laboratorium Mesin Perkakas, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

Kampus ITS, Keputih, Sukolilo – Surabaya 60111, Indonesia

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra,
Jalan. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

E-mail: oegiks@peter.petra.ac.id^{1}, suhardjono@me.its.ac.id², pramujati@me.its.ac.id³, pramono@me.its.ac.id⁴

ABSTRAK

Experimental modal analysis (EMA) merupakan salah satu cara yang digunakan untuk menganalisis karakteristik dinamik suatu struktur. EMA diaplikasikan di berbagai bidang, antara lain rekayasa struktur, otomotif, disain, maupun pemesinan. Dalam EMA pengukuran gaya *input* (*excitation force*) dan respon dari struktur (*frequency response function, FRF*) dilakukan dalam *domain* waktu (*time domain*) yang kemudian diubah dalam *domain* frekuensi (*frequency domain*) menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT)*. Penelitian ini menyajikan aplikasi EMA untuk mengukur karakteristik dinamik balok kayu yang dapat digunakan sebagai penguat (*stiffener*) struktur berongga berbentuk kotak, ataupun rangka kapal kayu. Informasi tentang karakteristik dinamik balok kayu sangat terbatas, sehingga EMA dilakukan untuk mengetahui *modal parameter* kayu sebelum digunakan sebagai penguat. Eksperimen dilakukan menggunakan *modal hammer* untuk memberikan gaya *input* pada balok kayu dan akselerometer (*accelerometer*) untuk mengukur responnya dalam bentuk percepatan. Hasil yang diperoleh digunakan untuk mengetahui *modal parameter* struktur berupa frekuensi pribadi (*natural frequency*), bentuk modus getar (*mode shape*) dan rasio redaman. Balok kayu memiliki dimensi panjang 860 mm, berpenampang bujur sangkar dengan panjang sisi 50 mm. Untuk melengkapi kajian eksperimen, juga dilakukan simulasi *modal analysis* terhadap balok kayu menggunakan metode elemen hingga (*finite element analysis*). Dari empat titik yang diuji, masing-masing menghasilkan kurva fungsi transfer, kurva amplitudo dan kurva sudut fasa. Dengan menganalisis kurva-kurva tersebut, nilai *modal parameter* balok dapat diketahui. Nilai frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga berada di kisaran 56 Hz, 334 Hz dan 854 Hz. Rasio redaman untuk ketiga frekuensi pribadi adalah 0,0178; 0,0139 dan 0,0121. Frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga balok kayu hasil simulasi *modal analysis* berada di kisaran 55,37 Hz, 339,71 Hz dan 921,71 Hz. Persentase perbedaan nilai frekuensi pribadi hasil simulasi dan eksperimen untuk frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketigase besar 1,13%; 1,71% dan 7,93%. Bentuk modus getar hasil eksperimen sesuai dengan bentuk modus getar hasil simulasi. Nilai koherensi data eksperimen untuk titik-titik pengujian berkisar antara 0,80 sampai 0,99. Hal ini berarti bahwa hasil pengukuran hanya dipengaruhi oleh *noise* yang relative kecil.

Kata kunci: *Experimental modal analysis, modal parameter, karakteristik dinamik, bentuk modus getar.*

ABSTRACT

Experimental modal analysis (EMA) is one among other methods to analyze dynamics characteristics of the structure. EMA is used widely in structural, automotive engineering, design and machining process for determination of modal parameters. EMA measures excitation force and frequency response function of the structure in time domain and then converts these data into frequency domain using Fast Fourier Transform (FFT). In this research EMA is applied to analyze the dynamics characteristics of wood structures that would be used as stiffener for boxed shaped work-piece or as a frame for traditional wood ship. The availability of the characteristics

dynamics' data for wood are limited, so EMA is very useful tool to determine modal parameters for specific wood structures. Experiments was conducted using modal hammer to excite the wood structure and an accelerometer to measure the response of the structure as acceleration data. The data acquired by EMA are used to determine modal parameters of wood structure in the terms of natural frequency, mode shapes and damping ratio. The dimension of wood being analyze (length \times width \times height) is 860 mm \times 50 mm \times 50 mm. Simulation of modal analysis using finite element method was carried out as a comparison to the experimental data. Four points or locations along the wood's length are excited using modal hammer to get data for determination of modal parameters of the wood structure. Several curves such as FRF, amplitude and phase angle are presented for modal parameters determination. Analysis based on those curves provide the modal parameter of the structure. The natural frequencies of the first three modes of wood structures are 56 Hz, 334 Hz and 854 Hz. Damping ratio for those natural frequencies are 0,0178; 0,0139 and 0,012. The natural frequencies of the first three modes of wood structures from modal analysis simulation are 55,37 Hz, 339,71 Hz and 921,71 Hz. Differences between experimental and simulation results in term of natural frequencies are 1,13%; 1,71% and 7,93%. It could be said that experimental data fit to those of the simulation. Mode shapes of the wood structure found both from experimental and simulation are also the same. Coherencies of the experimental data are between 0,80 and 0,99. Those mean that the influence of noises on the measured data are small.

Keywords: Experimental modal analysis, modal parameter, dynamic characteristics, mode shapes.

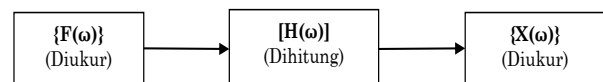
PENDAHULUAN

EMA merupakan salah satu cara yang sering digunakan untuk mengetahui *modal parameter* dari sebuah struktur, bila diperlukan informasi detail tentang karakteristik dinamik struktur yang bersangkutan. Sebagai contoh, untuk memonitor kondisi struktur jembatan terhadap berbagai jenis beban yang melewatinya, untuk memonitor menara, gedung bertingkat tinggi terhadap angin dan gempa, EMA merupakan cara yang efektif yang bisa dimanfaatkan dalam proses monitoring [1].

Zhang [2] menggunakan EMA untuk mengetahui karakteristik redaman pasir yang digunakan sebagai pondasi, terhadap berbagai jenis pembebanan baik *sinusoidal*, *random* maupun *impulse*.

Penggunaan EMA dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui *modal parameter* dari kayu yang akan digunakan untuk penguat atau rangka sebuah struktur. Mengingat data tentang karakteristik dinamik kayu sangat terbatas dan beragamnya jenis kayu, maka kayu yang digunakan sebagai rangka ini perlu diketahui karakteristik dinamikanya berdasarkan *modal parameter* yang diperoleh melalui EMA.

Dalam penelitian ini EMA dilakukan menggunakan sensor akselerometer untuk mengukur respon dari kayu terhadap gaya input yang berasal dari *modal hammer*. Hasil dari pengujian ini berupa kurva *frequency respon function* maupun kurva respon struktur terhadap gaya input. EMA dengan menggunakan *modal hammer* dipilih sebagai metode yang digunakan dalam penelitian ini karena metodenya sederhana namun memberikan hasil yang baik [3]. Secara skematik EMA bisa dinyatakan dalam Gambar 1.



Gambar 1. Skema *Experimental Modal Analysis*

Gaya input $\{F(\omega)\}$ dan respon (*output*) struktur $\{X(\omega)\}$ adalah besaran yang diukur dalam EMA, sedangkan $[H(\omega)]$ yang merupakan *frequency respon function* (FRF) merupakan hasil yang dihitung berdasarkan rasio respon struktur (*output*) terhadap gaya input.

Hubungan antara gaya input $\{F(\omega)\}$, respon (*output*) struktur $\{X(\omega)\}$ dan $[H(\omega)]$ dinyatakan dalam Persamaan 1.

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (1)$$

$H(\omega)$ dalam persamaan (1) adalah *compliance* (perpindahan/gaya, dalam m/N) yang besarnya bervariasi sesuai dengan frekuensi (ω). Respon struktur bisa dalam bentuk perpindahan (*displacement*), kecepatan (*velocity*) maupun percepatan (*acceleration*) [4]. Karena respon struktur dalam eksperimen ini diukur dengan akselerometer, maka respon struktur adalah percepatan, sehingga Persamaan 1 disesuaikan menjadi,

$$\ddot{X}(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (2)$$

$H(\omega)$ dalam Persamaan 2 adalah *inertance* (percepatan/gaya, dalam ms⁻²/N) yang besarnya bervariasi sesuai dengan frekuensi (ω).

Melalui EMA, *modal parameter* yang dapat diketahui adalah frekuensi pribadi, bentuk modus getar dan rasio redaman. Karena pengukuran dalam EMA dilakukan dalam *domain* waktu, maka *modal parameter* dari struktur dapat diketahui

setelah data pengukuran diubah dalam *domain* frekuensi menggunakan *Fast Fourier Transform*

Besarnya frekuensi pribadi *angular* (ω_0) diperoleh melalui kurva amplitudo (ms^{-2}) dalam domain frekuensi. Bentuk modus getar diperoleh berdasarkan kurva fungsi transfer (FRF) dan sudut fasa (φ). Besarnya sudut fasa dihitung berdasarkan Persamaan 3,

$$\varphi = \text{atan} \left(\frac{H_{Im}}{H_{Re}} \right) \quad (3)$$

Dalam Persamaan 3, parameter H_{Re} dan H_{Im} adalah harga riil dan imajiner dari $H(\omega)$.

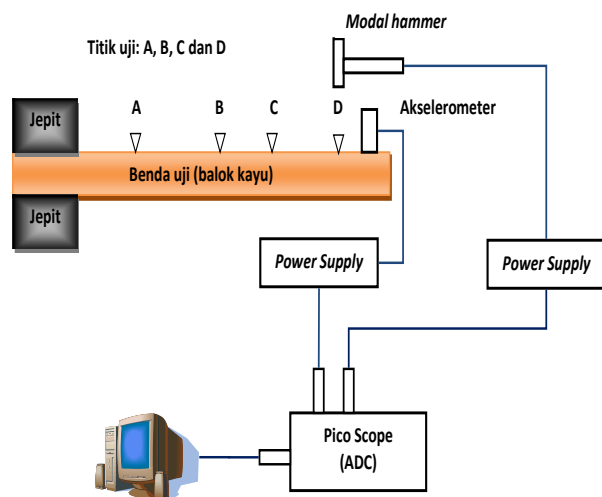
Nilai rasio redaman dari balok kayu yang diuji didapatkan dengan menghitung *loss factor* menggunakan metode *Half-power Bandwidth* [5] sebagaimana diformulasikan di Persamaan 4.

$$\eta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{2\pi(f_2 - f_1)}{2\pi f_0} = 2D \quad (4)$$

Parameter η adalah *loss factor*, D adalah rasio redaman, f_0 adalah frekuensi pribadi saat amplitudo maksimum (*peak amplitude*), yaitu $a_{maks} = a(f_0)$. Parameter f_1 adalah frekuensi saat $a_{(f_1)} = 0,707 a_{maks}$ dan f_2 adalah frekuensi saat $a_{(f_2)} = 0,707 a_{maks}$.

METODE PENELITIAN

Perangkat yang digunakan dalam eksperimen (EMA) terdiri dari beberapa komponen sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Skema Peralatan Eksperimen.

Titik A, B, C dan D adalah titik-titik uji yang dilakukan terhadap benda uji (balok kayu). Posisi titik-titik pengujian sebagai berikut: posisi titik A berada 300 mm dari ujung kiri balok kayu, posisi titik B berada 210 mm dari titik A, posisi titik C

berada 90 mm dari titik B, sedangkan titik D berada 130 mm dari titik C. Titik D berjarak 130 mm dari ujung kayu yang tidak dijepit.

Modal hammer digunakan untuk memberi gaya input terhadap balok kayu, sedangkan akselerometer digunakan untuk mengukur respon balok kayu (*output*) berupa percepatan. Posisi *modal hammer* berubah sesuai dengan posisi titik pengujian, yaitu di titik A, B, C maupun D. Posisi akselerometer diletakkan di salah satu ujung kayu yang tidak dijepit. Posisi akselerometer tidak mengalami perubahan selama pengujian berlangsung.

Power supply memberikan suplai daya pada *modal hammer* maupun akselerometer. ADC (*analog to digital converter*) merubah data analog menjadi data digital agar data dapat diolah dengan komputer.

Data hasil pengujian berupa gaya input dari *modal hammer* dan respon balok kayu dalam bentuk percepatan akan disimpan di komputer dalam bentuk *domain* waktu. Untuk memperoleh harga dari *modal parameter*, data pengukuran dalam domain waktu diubah menjadi data dalam domain frekuensi dengan *fast fourier transform*. Langkah-langkah eksperimen adalah:

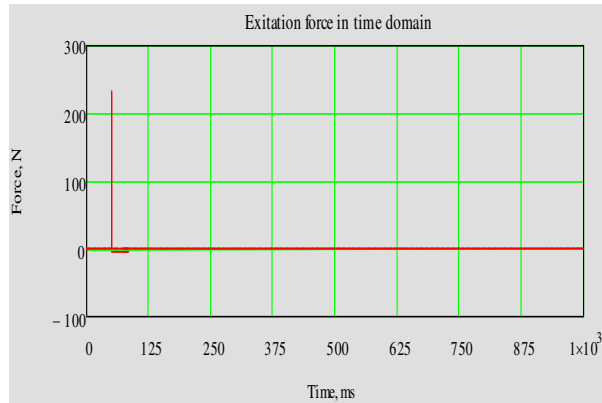
1. Menyiapkan peralatan eksperimen.
2. Melakukan pengujian untuk mengukur gaya input dari *modal hammer* dan respon balok kayu dalam bentuk percepatan (dalam domain waktu) di titik A, B, C dan D. Untuk tiap titik pengujian, dilakukan minimal sepuluh kali pengujian.
3. Mengolah data pengujian dalam domain waktu menjadi data dalam domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transform*.
4. Mengetahui dan menghitung *modal parameter* (frekuensi pribadi, bentuk modus getar dan rasio redaman).

HASIL DAN PEMBAHASAN

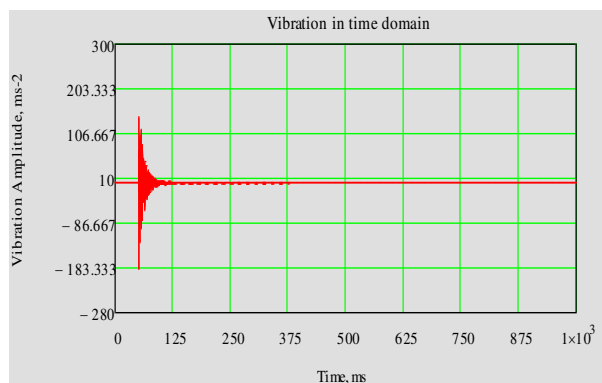
Dalam EMA *modal parameter* yang dapat diketahui/dihitung dari data pengujian dalam domain waktu yang sudah diubah menjadi domain frekuensi. Data pengujian berupa gaya input (gaya eksitasi) dan respon balok kayu dalam domain waktu di salah satu titik uji, yaitu titik A dapat dilihat di Gambar 3 dan 4.

Melalui data pengujian yang sudah dirubah dalam domain frekuensi, dapat disusun beberapa kurva antara lain kurva amplitudo getaran, kurva fungsi transfer, kurva sudut fasa dan kurva koherensi. Kurva amplitudo dan kurva fungsi transfer dari salah satu titik pengujian, yaitu titik A dapat dilihat di Gambar 5 dan 6. Kurva-kurva tersebut disusun berdasarkan rata-rata dari enam data pengukuran di titik A.

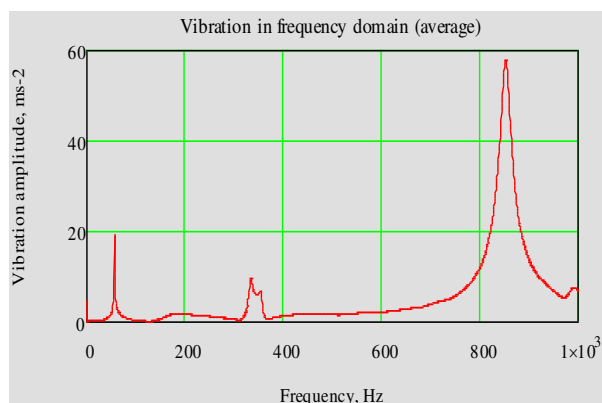
Modal parameter dalam bentuk frekuensi pribadi (Hz) dapat diketahui melalui kurva amplitudo getaran sebagaimana pada Gambar 5, dengan melihat nilai frekuensi (sumbu x) pada tiap *peak amplitude*. Melalui Gambar 5, besarnya frekuensi pribadi balok kayu bisa diketahui berdasarkan posisi *peak amplitude*, yang berada di frekuensi 56 Hz, 334 Hz dan 852 Hz. Dengan demikian dalam rentang pengujian yang dilakukan, yaitu pada rentang 0 - 1000 Hz, terdapat tiga nilai frekuensi pribadi balok kayu.



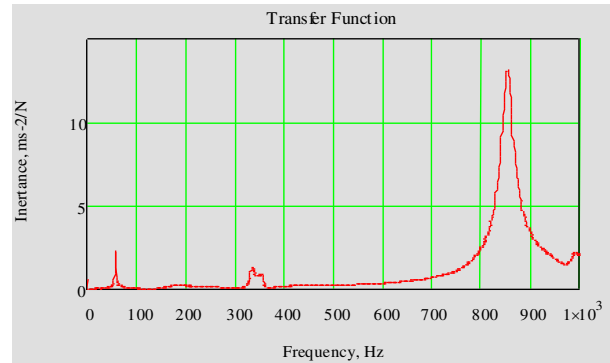
Gambar 3. Gaya Input di Titik uji A dalam Domain Waktu



Gambar 4. Respon Kayu (percepatan) di Titik uji A dalam Domain Waktu



Gambar 5. Kurva Amplitudo Getaran Titik uji A dalam Domain Frekuensi



Gambar 6. Kurva Fungsi Transfer (*inertance*) Titik Uji A dalam Domain Frekuensi

Frekuensi pribadi dari balok kayu juga dapat diketahui berdasarkan posisi *peak amplitude* dari kurva amplitudo getaran balok kayu di tiga titik pengujian lainnya, yaitu titik B, C dan D. Nilai frekuensi pribadi di titik pengujian lainnya juga memberikan nilai yang tidak jauh berbeda dengan nilai frekuensi pribadi yang diperoleh di titik pengujian A. Nilai frekuensi pribadi yang diperoleh dari ke empat titik pengujian, yaitu titik A, B, C, D dan nilai frekuensi pribadi yang diperoleh dari simulasi *modal analysis* dengan metode elemen hingga dicantumkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Frekuensi Pribadi Balok kayu di titik A, B, C, D dan Simulasi *Modal Analysis*

Titik Uji	Frekuensi Pribadi 1 (Hz)	Frekuensi Pribadi 2 (Hz)	Frekuensi Pribadi 3 (Hz)
A	56	334	852
B	56	332	854
C	56	333	852
D	56	328	852
Simulasi	55,37	339,71	921,71
Perbedaan frekuensi pribadi (eksperimen dan simulasi)	Persen	Persen	Persen
	1,13	1,71	7,93

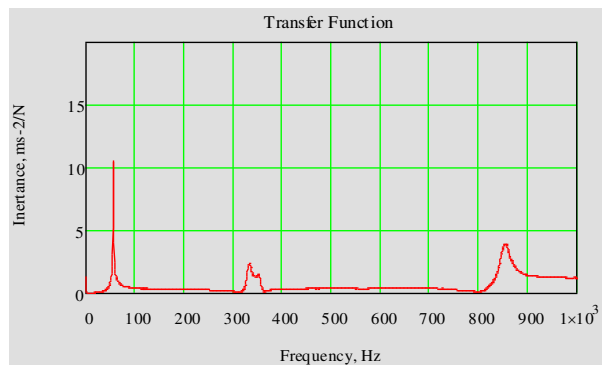
Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil pengukuran di empat titik uji memberikan hasil yang hampir sama. Hasil simulasi dengan metode elemen hingga sebagaimana tercantum di Tabel 1, memberikan nilai frekuensi pribadi sedikit berbeda dengan hasil pengujian. Namun demikian hasil simulasi menunjukkan kecenderungan yang sama dengan hasil pengujian. Persentase perbedaan antara hasil pengukuran dan hasil simulasi untuk frekuensi pribadi 1, 2 dan 3 sebesar 1,13%, 1,71% dan 7,93%.

Kurva fungsi transfer balok kayu (*inertance*, ms⁻²/N) di titik pengujian B, C dan D dapat dilihat di Gambar 7 sampai dengan Gambar 9.

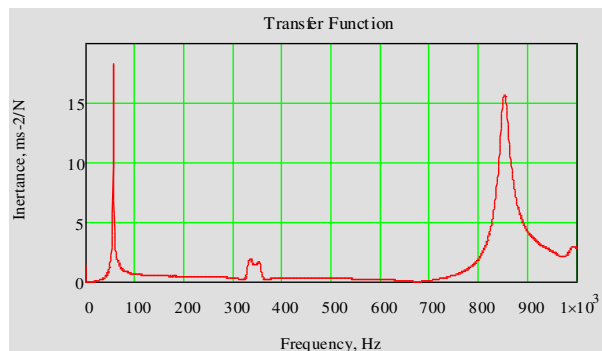
Selain kurva amplitudo getaran dan kurva fungsi transfer, dari data pengujian yang sudah dirubah menjadi domain frekuensi, juga dapat disusun kurva sudut fasa dan kurva koherensi. Kurva sudut fasa digunakan untuk menentukan arah getaran pada titik yang diukur, sehingga

bentuk modus getarnya dapat digambarkan, sedangkan kurva koherensi untuk melihat kualitas hasil pengukuran, dengan rentang nilai mulai 0 (sangat jelek) sampai dengan 1 (sangat baik). Kurva sudut fasa dan kurva koherensi di titik uji A dapat dilihat di Gambar 10 dan 11.

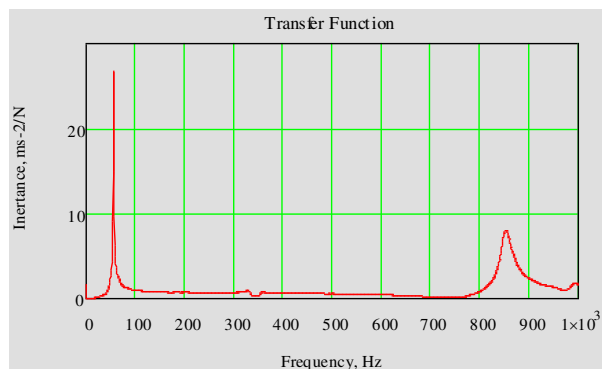
Dari kurva amplitudo getaran (Gambar 5), kurva fungsi transfer (Gambar 6), kurva sudut fasa (Gambar 10) dan kurva koherensi (Gambar 11), tersebut dapat diketahui nilai frekuensi pribadi (Hz), *inertance* (ms^{-2}/N), sudut fasa (derajat), koherensi dan rasio redaman di tiap titik pengujian. Berbagai nilai yang dapat diketahui dan dihitung dari data eksperimen (EMA), dicantumkan pada Tabel 2.



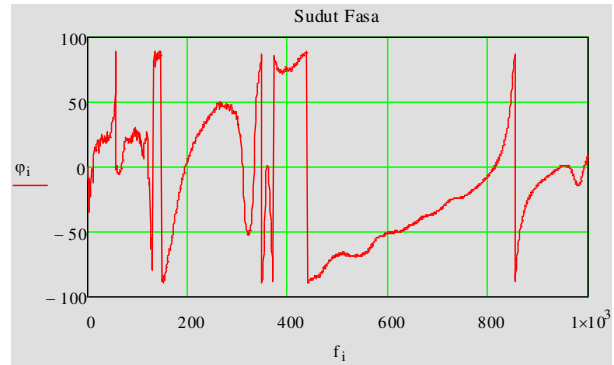
Gambar 7. Kurva Fungsi Transfer Balok Kayu Titik Uji B dalam Domain Frekuensi



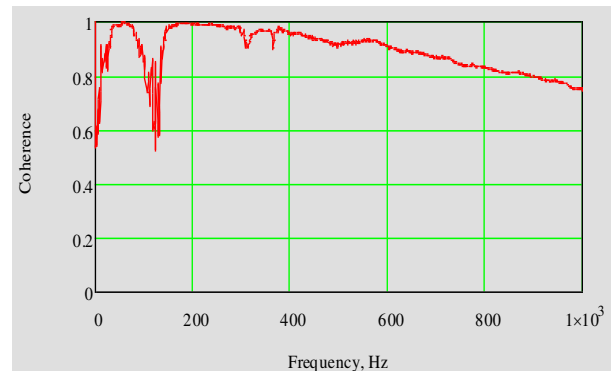
Gambar 8. Kurva Fungsi Transfer Balok Kayu Titik Uji C dalam Domain Frekuensi



Gambar 9. Kurva Fungsi Transfer Balok kayu Titik Uji D dalam Domain Frekuensi



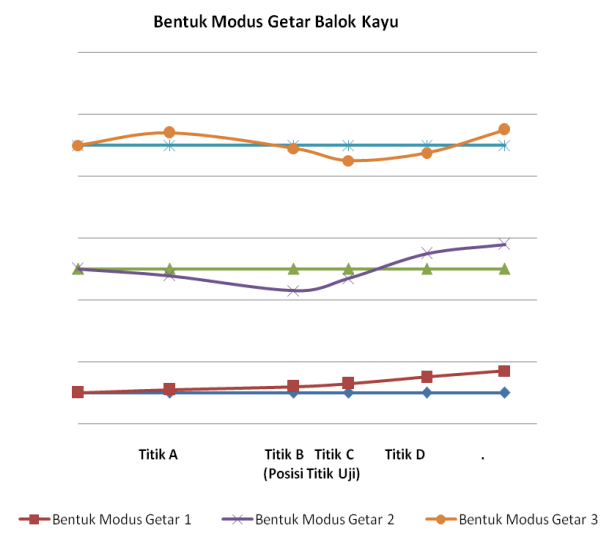
Gambar 10. Kurva Sudut Fasa Titik Uji A



Gambar 11. Kurva Koherensi Titik Uji A

Nilai koherensi dari berbagai titik pengujian berada pada rentang 0,80 sampai dengan 0,99. Hal tersebut mengindikasikan bahwa hasil pengukuran hanya dipengaruhi oleh *noise* yang relatif kecil.

Bentuk modus getar disusun berdasarkan nilai *inertance* (ms^{-2}/N) dari kurva fungsi transfer (Gambar 6) dan kurva sudut fasa (Gambar 10). Bentuk modus getar 1 (untuk frekuensi pribadi 1), bentuk modus getar 2 (untuk frekuensi pribadi 2) dan modus getar 3 (untuk frekuensi pribadi 3) hasil eksperimen dapat dilihat di Gambar 12.

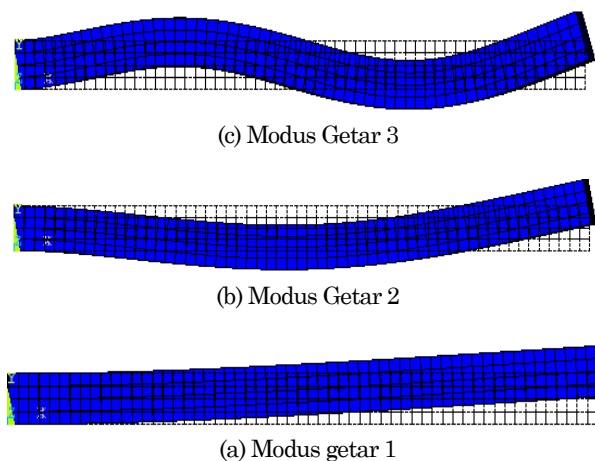


Gambar 12. Modus Getar Balok Kayu Hasil Eksperimen

Tabel 2. Hasil Uji Parameter Getar Balok kayu

Titik Uji	Terminologi	Frekuensi Pribadi 1	Frekuensi Pribadi 2	Frekuensi Pribadi 3
A	Frekuensi, (Hz)	56	327	852
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	2,2775	0,5213	13,0200
	Sudut Fasa, (derajat)	88,72	-42,65	81,79
	<i>Coherence</i>	0,99	0,97	0,81
	Rasio Redaman	0,0178	0,0134	0,0129
B	Frekuensi (Hz)	56	328	854
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	10,5900	1,4110	3,9565
	Sudut Fasa, (derajat)	69,55	-43,73	-71,53
	<i>Coherence</i>	0,99	0,96	0,80
	Rasio Redaman	0,0178	0,0135	0,0117
C	Frekuensi (Hz)	56	326	852
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	18,2530	0,6202	15,7230
	Sudut Fasa, (derajat)	45,20	-37,17	-85,72
	<i>Coherence</i>	0,99	0,98	0,87
	Rasio Redaman	0,0178	0,0150	0,0117
D	Frekuensi (Hz)	56	328	853
	<i>Inertance</i> , (ms^{-2}/N)	26,6820	0,9350	7,9787
	Sudut Fasa, (derajat)	67,29	87,28	-87,72
	<i>Coherence</i>	0,99	0,99	0,95
	Rasio Redaman	0,0178	0,0137	0,0123

Bentuk modus getar 1 (untuk frekuensi pribadi 1), bentuk modus getar 2 (untuk frekuensi pribadi 2) dan modus getar 3 (untuk frekuensi pribadi 3) hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 13. Bentuk modus getar 1, 2, dan 3 hasil eksperimen (Gambar 12) maupun bentuk modus getar 1, 2, dan 3 hasil simulasi (Gambar 13) menunjukkan hasil yang serupa.

**Gambar 13.** Modus Getar Balok Kayu Hasil Simulasi

Bentuk modus getar hasil simulasi (Gambar 13) dilakukan dengan *modal analysis simulation* menggunakan *software Ansys 12*. Simulasi *modal analysis* dilakukan sebagai data pembandingan dalam eksperimen, sekaligus bermanfaat untuk memberikan gambaran secara cepat terhadap fenomena yang sedang diuji. Simulasi dan eksperimen semestinya memberikan hasil dengan *trend* yang sama.

KESIMPULAN

EMA dapat digunakan untuk mengetahui nilai *modal parameter* yang diperlukan untuk menentukan karakteristik dinamik dari balok kayu yang diuji, berupa frekuensi pribadi, bentuk modus getar maupun rasio redaman. Tiga nilai frekuensi pribadi balok kayu hasil EMA ada di kisaran 56 Hz, 334 Hz dan 852 Hz. Simulasi yang dilakukan untuk memberikan data pembandingan, menghasilkan tiga frekuensi pribadi di kisaran 55,37 Hz, 339,71 Hz dan 921,71 Hz. Persentase perbedaan nilai frekuensi pribadi hasil simulasi dan eksperimen untuk frekuensi pribadi pertama, kedua dan ketiga sebesar 1,13%; 1,71% dan 7,93%.

Tiga bentuk modus getar dari balok kayu yang diuji juga dapat diketahui dari eksperimen yang dilakukan. Ketiga bentuk modus getar hasil eksperimen juga sesuai dengan hasil simulasi.

Eksperimen yang dilakukan memiliki nilai koherensi antara 0,80 sampai dengan 0,99 di ke empat titik yang diuji, yaitu titik A, B, C dan D. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil pengukuran dipengaruhi oleh *noise* yang relatif kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rainieri, C., Fabbrocino, G., and Cosenza, E., Automated Operational Modal Analysis as Structural Health Monitoring Tool: Theoretical and Applicative Aspects, *Key Engineering Materials*, 347, 2007, pp. 479-484, Trans Tech Publications, Switzerland.
- [2] Zhang, X.J. and Aggour, M.S., *Damping Determination of Sands under Different Loadings*, Paper No. 364, Eleventh World Conference on

- Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd, 1996.
- [3] Carne, T.G. and Stasiunas, E.C., Lessons Learned in Modal Testing – Part 3: Transient Excitation for Modal Testing, More Than Just Hammer Impacts, *Experimental Techniquis*, May/Juni 2006, pp. 69-79.
- [4] Koenigsberger, F. and Tlustý, J., *Machine Tool Structures*, 1, 1st edition, Pergamon Press Ltd., 1970.
- [5] Zaveri, K., *Modal Analysis of Large Structures–Multiple Exciter Systems*, 1st edition, 2nd print, Bruel & Kjaer, November 1984.